

**DE 197 36 653 C 1**

The diagram illustrates a turbo-code system with the following components and connections:

- Input:**  $X_n$  enters block 24.
- Block 24:** Receives  $X_n$  and  $Y_{1,n}$ . It outputs a weighted version of  $X_n$  (labeled "gewichtete Version von  $\{X_n\}$ ") and  $Le_{1,n}$  to block 28.
- Block 28:** A "Turbo-Code-Interleaver" that receives  $Le_{1,n}$  and outputs  $Y_{2,n}$  to block 26.
- Block 26:** Receives  $Y_{2,n}$  and a "CS" signal. It outputs  $Y_{1,n}$  back to block 24.
- Block 30:** A "Turbo-Code-Deinterleaver" that receives  $Le_{2,n}$  and outputs  $Le_{2,n}$  nach Interleaving.
- Feedback Loop:** The output "Le\_{2,n} nach Interleaving" is fed back to block 24 via a line labeled "22".

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Einrichtung zur Abschätzung der Dienstqualität auf Übertragungskanälen in einem digitalen Übertragungssystem, bei dem zur Kanalcodierung senderseitig in einem Turbo-Codierer eine Turbo-Codierung und empfängerseitig in einem Turbo-Decodierer eine Turbo-Decodierung mit Soft-Decision-Ausgangssignalen durchgeführt wird.

In P. Jung, "Comparison of Turbo-Code Decoders Applied to Short Frame Transmission Systems", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Band 14 (1996) Seiten 530-537 wird die Anwendung von Turbo-Codes für digitale Übertragungssysteme untersucht, wobei sowohl Codierer als auch Decodierer für die Turbocodes in der Übertragungsstrecke untersucht werden. Die Decodierung der Turbocodes beruht auf der Verwendung von Soft-Input/Soft-Output-Decodierern, die entweder unter Verwendung von MAP(Maximum a-posteriori)-Symbolschätzern oder von MAP-Sequenzschätzern, beispielsweise einem Schätzer mit einem a-priori-Soft-Output-Viterbi-Algorithmus (APRI-SOVA) verwirklicht werden können. In dieser Veröffentlichung werden vier verschiedene Decodiereranordnungen und ihre Fähigkeiten, bestimmte Fehlerraten zu verarbeiten, beschrieben. Außerdem wird die Leistungsfähigkeit dieser Decoder bei verschiedenen Anwendungsfällen untersucht. Es wird festgestellt, daß die Turbocodes und deren iterative Decodierung eine wirksame Maßnahme gegen Paketfehler ist.

In ICC '95, Seattle, Washington, Juni 18-22, 1995, "Turbo Codes for BCS Applications", D. Divsalar und F. Pollara, werden Turbocodes vorgeschlagen, um eine Fehlerkorrektur bis nahe an die sogenannte Shannon-Grenze zu erreichen. Dazu sollen verhältnismäßig einfache Komponentencodes und große Interleaver verwendet werden. In dieser Veröffentlichung werden die Turbocodes in einem Codierer mit mehrfachen Codes erzeugt und in einem geeigneten Decodierer decodiert. Die Turbocodes wurden von Berrou et al. 1993 eingeführt (siehe C. Berrou, A. Glavieux und P. Thitimayshima, "Near Shannon limit area correction coding: Turbo codes" Proc. 1993 IEEE International conference on communications, Seiten 1064-1070). Mit dieser Methode kann einerseits eine sehr gute Fehlerkorrektur erreicht werden.

Aus ETT European Transactions on Telecommunications, Vol. 6, No. 5, September-October 1995, "Iterative Correction of Intersymbol Interference: Turbo-Equalization", Catherine Douillard et al. ist die sogenannte Turbo-Entzerrung bekannt, mit der die nachteiligen Effekte der Intersymbolinterferenz bei digitalen Übertragungssystemen behoben werden sollen, die durch Faltungscodes geschützt sind. Der Empfänger führt zwei aufeinanderfolgende Soft-Output-Entscheidungen aus, die von einem Symboldetektor und einem Kanaldecodierer über einen iterativen Prozess durchgeführt werden. Bei jeder Iteration wird extrinsische Information aus dem Detektor und dem Decoder bei der nächsten Iteration wie bei der Turbodecodierung verwendet. Es wird gezeigt, daß mit der Turbo-Entzerrung Intersymbolinterferenzeffekte bei Mehrweg-Kanälen überwunden werden können.

Zukünftige Übertragungssysteme, beispielsweise das Europäische UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) erfordern die Unterstützung einer Vielzahl von koexistierenden Trägerdiensten mit Trägerdatenraten von bis zu 2 Mbit/s in einer flexiblen Weise, wobei der bestmögliche spektrale Wirkungsgrad angestrebt wird. In dem ACTS (Advanced Communications Technologies and Services) Projekt AC090 FRAMES (Future Radio Wideband Multiple

Access Systems) wurde ein MA(Multiple Access)-Schema entwickelt, welches sich FRAMES Multiple Access(FMA) nennt und die Erfordernisse von UMTS erfüllt. Als Übertragungssystem der dritten Generation, welches einen weiten Bereich von Anwendungsgebieten, Trägerdiensten und unterschiedlichen Szenarios umfaßt, muß FMA gegenwärtige und zukünftige Entwicklungen von UMTS Funk-Interface-Standards zu erfüllen. FMA umfaßt zwei Betriebsarten, nämlich WB-TDMA (Wideband Time Division Multiple Access) mit und ohne Spreizung und Kompatibilität mit GSM (Global System for Mobile Communications) und WB-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access). Obwohl hier im wesentlichen ein System nach FMA betrachtet wird, können auch andere Übertragungssysteme mit Vielfachzugriffsverfahren, beispielsweise FDMA (Frequency Division Multiple Access) oder MC-CDMA (Multicarrier-CDMA) oder Kombinationen der erwähnten Übertragungssysteme einbezogen werden.

Im Hinblick auf die hohe Leistungsfähigkeit der Turbocodes ist es wünschenswert, diese bei digitalen Übertragungssystemen einzusetzen. Die vielfältigen Erfordernisse, beispielsweise bei FMA machen es jedoch erforderlich, beim Einsatz derartiger Turbocodes darauf zu achten, daß die Datenübertragung nicht durch die Übertragung von Fehlerkorrekturcodes zu stark belastet wird.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, die Dienstqualität eines Übertragungskanals abzuschätzen, ohne zusätzlichen Aufwand betreiben zu müssen.

Erfindungsgemäß ist dazu das eingangs erwähnte Verfahren dadurch gekennzeichnet, daß die Dienstqualität aus den Varianzen der Soft-Decision-Ausgangssignale an dem Turbo-Decodierer bestimmt wird.

Unter dem Begriff Dienstqualität wird hier folgendes verstanden. Für verschiedene Dienste gelten bestimmte QoS-Kriterien (QoS = Quality of Service = Dienstqualität), und die Definitionen der QoS-Kriterien für verschiedene Trägerdienste sind im Rahmen von FRAMES ausgearbeitet worden. Ein wichtiger Bestandteil eines QoS-Kriteriums ist die Trägerdatenrate R. Das QoS-Kriterium umfaßt auch eine maximal zulässige Fehlerrate  $P_b^G$  oder eine Paketverlustrate  $P_l^G$  in Kombination mit einer maximalen Ausfallwahrscheinlichkeit  $P_{out}^G$ . Im Falle von leitungsvermittelten Diensten muß die Wahrscheinlichkeit  $P\{P_b > P_b^G\}$ , daß die augenblickliche Bitfehlerrate  $P_b$  die  $P_b^G$  übersteigt, nicht größer sein als  $P_{out}^G$ , das heißt

$$\Pr\{P_b > P_b^G\} < P_{out}^G.$$

Bei Sprachübertragung ist  $P_b^G$  gleich  $10^{-3}$  und  $P_{out}^G$  gleich 0,05. Bei Paketdiensten gilt eine ähnliche Bedingung für die augenblickliche Paketverlustrate  $P_l$ :

$$\Pr\{P_l > P_l^G\} < P_{out}^G.$$

Außer den Kriterien bezüglich Pr gibt es noch weitere Bedingungen im Rahmen des QoS-Kriteriums. Hier werden jedoch hauptsächlich die QoS-Parameter  $P_b^G$ ,  $P_l^G$  und  $P_{out}^G$  betrachtet, die unmittelbar mit der Wahl des Fehlerkorrekturcodes (ECC) zu tun haben. Bei ECC bestimmen das Vielfachzugriffsverfahren, die Modulation und die Paketparameter im wesentlichen die Codierungsrate  $R_c$ . Mit anderen Worten hat die Codierungsrate  $R_c$  einen unmittelbaren Zusammenhang mit der Frage, ob ein QoS-Kriterium für einen bestimmten Dienst erfüllt wird oder nicht.

Es ist ersichtlich, daß die Bestimmung der Dienstqualität im Zusammenhang mit den QoS-Kriterien wichtig ist, wobei diese Bestimmung gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren möglich ist, ohne zusätzlichen Aufwand zu betrei-

ben, da die Varianzen empfängerseitig ohne zusätzliche Informationen festgestellt werden können.

Bei einem Verfahren, bei dem empfängerseitig ein Soft-Input/Soft-Output-Symbol oder -Sequenzschätzer verwendet wird, ist es vorteilhaft, wenn die Dienstqualität aus den Varianzen  $\sigma^2$  der Soft-Decision-Ausgangssignale des Turbo-Decodierers bestimmt wird, wobei vorteilhafterweise aus den Varianzen  $\sigma^2$  die Bitfehlerrate als Maß für die Dienstqualität berechnet wird.

Bei einem Verfahren, bei dem empfängerseitig ein MAP-Symbolschätzer oder ein MAP-Sequenzschätzer verwendet wird, ist es vorteilhaft, wenn die Dienstqualität aus den Varianzen  $\sigma^2_{I,I,R}$  der Soft-Decision-Ausgangssignale des Turbo-Decodierers bestimmt wird.

Bei einem Verfahren, bei dem empfängerseitig ein Viterbi-Algorithmus zur Sequenzschätzung verwendet wird, ist es vorteilhaft, wenn die Dienstqualität aus den Varianzen  $\sigma^2_{VIT}$  der Soft-Decision-Ausgangssignale des Turbo-Decodierers bestimmt wird.

Da das erfindungsgemäße Verfahren sowohl bei MAP-Schätzern als auch bei einer Schätzung durch einen Viterbi-Algorithmus einsetzbar ist, gibt es praktisch keine Einschränkung bezüglich der wichtigsten Verfahren zur Sequenz- und Symbolschätzung. Dies gilt, obwohl in der folgenden speziellen Beschreibung diese Aussage nur im Zusammenhang mit einem MAP-Symbolschätzer belegt wird.

Desweiteren ist es bei dem erfindungsgemäßen Verfahren vorteilhaft, wenn als Turbo-Code ein RCPTC (Rate Compatible Punctured Turbo Code) verwendet wird. Wie aus der detaillierten Beschreibung ersichtlich wird, ist ein derartiger Code besonders flexibel und geeignet für die Zwecke der Erfindung. Der RCPTC ermöglicht den Übergang von festgelegten ECC-auf flexible ECC-Strategien, wobei letztere auf zeitlich variierende Erfordernisse abgestimmt sind, so daß eine flexible Linklayer Controll und Medium Zugriffskontrolle möglich ist.

Eine Einrichtung zur Abschätzung der Dienstqualität auf Übertragungskanälen in einem digitalen Übertragungssystem mit einem senderseitigen Turbo-Codierer und einem empfängerseitigen Turbo-Decodierer, der Soft-Decision-Ausgangssignale abgibt, ist zur Durchführung des vorstehend angegebenen Verfahrens gekennzeichnet durch eine Recheneinrichtung, die die Dienstqualität aus den Varianzen der Soft-Decision-Ausgangssignale des Turbo-Decodierers berechnet.

Eine vorteilhafte Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Einrichtung ist dadurch gekennzeichnet, daß der Turbo-Codierer zwei parallel geschaltete RSC-Codierer, einen Interleaver, der einem der RSC-Codierer vorgeschaltet ist und eine Punktierungs/Multiplexer-Einrichtung aufweist, der die systematischen Sequenzen und die codierten Sequenzen von dem RSC-Codierer zugeführt wird, und daß der Turbo-Decodierer zwei RSC-Decodierer, einen Turbo-Code-Interleaver zwischen einem Ausgang des ersten RSC-Decodierers und einem Eingang des zweiten RSC-Decodierers sowie einen Turbo-Code-Deinterleaver zwischen einem Ausgang des zweiten RSC-Decodierers und einem Eingang des ersten RSC-Codierers aufweist. Diese Anordnung des Turbo-Codierers und des Turbo-Decodierers stellt eine einfache und für die meisten Anwendungsfälle ausreichende Lösung für diese beiden Komponenten dar, wobei der erzeugte RCPTC allen Anforderungen gerecht wird.

Eine vorteilhafte Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Einrichtung ist dadurch gekennzeichnet, daß die Punktierungs/Multiplexer-Einrichtung eine Punktierung nach der sogenannten Berrou's-Punktierung durchführt, bei der nur die nichtsystematische Information punktiert wird. Diese Art der Punktierung ist bei geringeren Werten des Signal/

Rausch-Verhältnisses vorteilhaft.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Einrichtung ist dadurch gekennzeichnet, daß die Punktierungs/Multiplexer-Einrichtung eine Punktierung nach der sogenannten UKL-Punktierung durchführt, bei der sowohl die systematische als auch die nicht-systematische Information punktiert wird. Diese Art der Punktierung ist vorteilhaft bei höheren Signal/Rausch-Verhältnissen und daher bei Bitfehlerraten von  $< 10^{-4}$ .

Schließlich ist eine vorteilhafte Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Einrichtung dadurch gekennzeichnet, daß die Zahl der Decodierungs-Iterationen in dem Turbo-Decodierer unter Berücksichtigung der damit verbundenen Zeitverzögerung und der Verbesserung des Decodierungsergebnisses optimiert wird.

Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird zur Punktierung die sogenannte Berrou's-Punktierung eingesetzt, bei der nur die nichtsystematische Information punktiert wird.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird zur Punktierung die sogenannte UKL-Punktierung eingesetzt, bei der sowohl die systematische als auch die nicht-systematische Information punktiert wird.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird die Zahl der Decodierungsiterationen unter Berücksichtigung der damit verbundenen Zeitverzögerung und der Verbesserung des Decodierungsergebnisses optimiert.

Die beiden genannten Punktierungsverfahren und die Optimierung der Decodierungsiterationszahl dienen vorteilhafterweise dazu, die Abschätzung der Dienstqualität auf den Übertragungskanälen mit größerer Sicherheit durchführen zu können.

Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nun anhand der beiliegenden Zeichnungen beschrieben. Es zeigen:

Fig. 1 ein Blockdiagramm eines Turbo-Codierers;

Fig. 2 ein Blockdiagramm eines RSC-Codierers, wie er in einem Turbo-Codierer nach Fig. 1 verwendet wird;

Fig. 3 ein Blockdiagramm eines Turbo-Decodierers;

Fig. 4 eine graphische Darstellung zur Leistungsfähigkeit eines RCPTC's bei einem AWGN-Kanal in Abhängigkeit von der Zahl der Iterationen bei der Turbo-Decodierung;

Fig. 5 eine graphische Darstellung der Leistungsfähigkeit eines RCPTC's bei einem Rayleigh-Kanal bei verschiedener Anzahl von Iterationen bei der Turbo-Decodierung;

Fig. 6 eine graphische Darstellung der Leistungsfähigkeit eines RCPTC's bei einem AWGN-Kanal in Abhängigkeit von unterschiedlichen Codierungsraten;

Fig. 7 eine graphische Darstellung der Leistungsfähigkeit eines RCPTC's bei einem Rayleigh-Kanal in Abhängigkeit von verschiedenen Codierungsraten;

Fig. 8 eine graphische Darstellung der Leistungsfähigkeit eines RCPTC's bei einem AWGN-Kanal für verschiedene Codierungsraten;

Fig. 9 eine graphische Darstellung der Leistungsfähigkeit eines RCPTC's bei einem Rayleigh-Kanal bei unterschiedlichen Codierungsraten;

Fig. 10 eine graphische Darstellung der Beziehung zwischen der Bitfehlerrate BER und der Varianz  $\sigma^2_{I,I,R}$  am Ausgang des zweiten Decodierers; und

Fig. 11 eine graphische Darstellung der Varianz  $\sigma^2_{I,I,R}$  im Verhältnis zum Signal/Rausch-Verhältnis bei fehlerhaft beziehungsweise korrekt decodierten Paketen.

Im Hinblick auf einen ökonomischen Einsatz der Hardware sollte die ECC-Schaltung möglichst universell einsetzbar sein, während die ECC-Konfiguration durch eine Software-Steuerung eine hohe Flexibilität gestatten sollte. Der

hier verwendete RCPTC ermöglicht dies, weil er die erforderliche Flexibilität aufweist. Der RCPTC kann mit dem in Fig. 1 gezeigten Turbo-Codierer 2 erzeugt werden. Der Turbo-Codierer 2 weist  $N_c = 2$  binäre, rekursive, systematische Faltungscodierer 4, 6 (RSC) mit einer kleinen Constraint-Länge, beispielsweise zwischen 3 und 5, auf, die unter Verwendung eines Turbo-Interleavers 8 parallel geschaltet sind. Die Eingangssequenz  $u$  wird dem Codierer 4 (RSC, Code 1) und über den Turbo-Code-Interleaver 8 an den Codierer 6 (RSC, Code 2) sowie einer Punktierungs/Multiplexer-Einrichtung 10 zugeführt. Die Punktierungs/Multiplexer-Einrichtung erhält einen weiteren Eingang C1 von dem Codierer 4 und einen weiteren Eingang C2 von dem Codierer 6. Der Ausgang der Punktierungs/Multiplexer-Einrichtung 10 ist die Ausgangssequenz  $b$ .

Bei dem Turbo-Codierer 2 ist die minimale Coderate  $R_c$ , min gleich  $1/(N_{c+1}) = 1/3$ . Die minimale Codierungsrate  $R_c$ , min könnte weiter reduziert werden, indem zusätzliche RSC-Codierer eingesetzt werden.

Die binäre Eingangssequenz  $u$ , die eine endliche Zeitdauer hat, wird in den Codierer 4 eingegeben und ergibt an dessen Ausgang die Redundanzsequenz  $C_1$  mit derselben endlichen Dauer wie  $u$ . Die Sequenz  $u$ , die die Sequenz  $u$  nach dem Interleaving darstellt, wird in den Codierer 6 gegeben. Die Codierung in dem Codierer 6 ergibt die Redundanzsequenz  $C_2$ . Die Redundanzsequenzen  $C_1$  und  $C_2$  und die Sequenz  $u$  werden punktiert und gemultiplext, um die Ausgangssequenz  $b$  zu bilden. Der Turbocodierer ist ein systematischer Codierer, wobei  $u$  die Basis der in  $b$  enthaltenen, systematischen Information ist.

Ein RSC-Codierer, wie er für die Codierer 4 und 6 verwendet werden kann, ist in Fig. 2 am Beispiel des Codierers 4 dargestellt. An einem Eingang des Codierers 4 steht die Sequenz  $u$  als systematische Information an. Die Sequenz  $u$  gelangt über ein Additionsglied 12 zu einer Verzögerungsstufe 14 und einem weiteren Additionsglied 16. Die Ausgangssignale der Verzögerungsstufe 14 gelangt an eine zweite Verzögerungsstufe 18 und an das Additionsglied 12. Die Ausgangssignale der zweiten Verzögerungsstufe 18 gelangen an die Additionsstufe 12 und die Additionsstufe 16. Der Ausgang der Additionsstufe ist dann die Redundanzsequenz  $c_1$ .

Bei der Wahl dieses Codierers spielen die Hardwarekosten eine Rolle, die so niedrig wie möglich gehalten werden sollten. Aus diesem Grund sind die beiden RSC-Codierer zur Verwendung im Rahmen von FRAMES identisch und haben eine Constraint-Länge von 3. Obwohl diese RSC-Codierer nur vier Zustände haben, zeigen sie eine gute Leistungsfähigkeit bei niedrigen Werten des Signal/Rausch-Verhältnisses  $E_b/N_0$ . Daher ist die Leistungsfähigkeit des RCPTC's mit diesen Codierern bei niedrigen Signal-Rausch-Verhältnissen vorteilhaft.

Die Ausgangssequenz  $b$  des Turbo-Codierers 2 gelangt über den Übertragungskanal und einen Demodulator zu dem Turbo-Decodierer 22 (Fig. 3), der einen RSC-Codierer 24 und einen zweiten RSC-Decodierer 26 aufweist. Zwischen einem Ausgang des Decodierers 24 und einem Eingang des Decodierers 26 ist ein Turbo-Code-Interleaver 28 vorgesehen. Zwischen einem Ausgang des Decodierers 26 und einem Eingang des Decodierers 24 ist ein Turbo-Code-Interleaver 30 vorgesehen. Die Decoder 24, 26 sind Soft-Input/Soft-Output-Decoder.

Der Demodulator (nicht gezeigt) liefert Schätzwerte  $x_n$  der systematischen Information  $u_n$ , die in  $u$  enthalten sind, sowie Schätzwerte  $y_{1,n}$  und  $y_{2,n}$  der übertragenen Redundanzbits, die von den Codierern 4 beziehungsweise 6 erzeugt worden sind. Die beiden Decodierer 24, 26 benötigen eine Kanalzustandsinformation (CSI = Channel State Infor-

mation), die aus den augenblicklichen Signalamplituden und der Rauschvarianz besteht. Jeder der Decodierer 24, 26 verarbeitet die systematische Information, die Redundanz und a-priori-Information  $I_{e1,n}$  und  $I_{e2}$ , unter Verarbeitung der CSI, wodurch die extrinsische Information  $I_{e2,n}$  und  $I_{e1,n}$  erzeugt wird, die dann als a-priori-Wissen bei dem nachfolgenden Decodierer verwendet wird. Die Decodierung ist iterativ, und das Ergebnis der Decodierung wird mit jeder Iteration verbessert. Das Maß der Verbesserung nimmt jedoch allmählich mit der weiteren Iteration ab. Nach einer gewissen Anzahl von Iterationen wird das Ausgangssignal des Turbo-Decodierers 22 in einen Detektor (nicht gezeigt) zugeführt, wie es bei derartigen Übertragungssystemen üblich ist.

Um den Einsatz des RCPTC's auf die vorhandenen Dienststerfordernisse anzupassen, könnte man daran denken, die RSC-Codierer anzupassen, was jedoch zu einer unerwünschten Mehrbelastung im Bezug auf die Hardwarekosten führen würde. Die Anpassung der Interleavergroße auf die speziellen Dienste ist an sich bekannt und stellt auch bei der Verwendung eines RCPTC's wegen dessen Flexibilität ein Problem dar.

Desweiteren kann die Zahl der Iterationen bei der Decodierung entsprechend dem QoS-Kriterium eingestellt werden unter Berücksichtigung der gesamten Codierungskomplexität. Zwei Möglichkeiten, um diese Eigenschaft des Turbocodes auszunutzen, sind an dem Empfänger gegeben. Für ein vorgegebenes QoS-Kriterium kann die Zahl der Iterationen mit ansteigendem Signal/Rausch-Verhältnis  $E_b/N_0$  erhöht werden. Dies ist besonders vorteilhaft bei Fading-Kanälen, beispielsweise bei Übertragungskanälen. Andererseits kann die Zahl der Iterationen auch mit einem sich zeitlich ändernden QoS-Kriterium variiert werden. Die Einstellbarkeit der Zahl der Decodierungs-Iterationen ist nur bei der Verwendung von Turbo-Codes, insbesondere eines RCPTC's gegeben.

Eine weitere Möglichkeit die Leistungsfähigkeit in einem System mit einem RCPTC zu verbessern, besteht darin, die Punktierung einzustellen, so daß ein RCPTC mit variierenden Coderaten  $R_{c,min} \leq R_c \leq R_{c,max}$  bereitgestellt werden können, wodurch die Codierungseigenschaften bei unveränderten Turbocode-Interleavern und RSC-Codierern geändert werden können.

Für die Punktierung stehen prinzipiell die Sequenzen  $u$ ,  $c_1$  und  $c_2$  zu Verfügung. Wenn zwei der Sequenzen voll durch Punktierung unterdrückt werden, wird die maximale Coderate  $R_{c,max} = 1$  angenommen. In diesem Fall hängen die Codierungseigenschaften davon ab, welche der Sequenzen punktiert werden. Wenn beispielsweise die Redundanzsequenzen  $c_1$  und  $c_2$  vollständig punktiert werden, wobei nur die Sequenz  $u$  unverändert durchgelassen wird, ist eine ECC nicht erhältlich, und Zeit Diversity-Gewinne sind an den Empfängern bei Fading-Kanälen nicht erreichbar. In diesem Fall reduziert sich der Turbo-Decodierer auf einen einfachen Schwellenwertdetektor.

Wenn eine der Redundanzsequenzen  $C_1$  oder  $C_2$  voll durch die Punktierung unterdrückt wird, wobei nur die zweite Redundanzsequenz zusammen mit der Sequenz  $u$  hindurchtreten kann, wird der Turbo-Codierer zu einem herkömmlichen RSC-Codierer. Der Turbo-Decodierer reduziert sich zu einem RSC-Decodierer, der zur Durchführung einer halben Iteration realisiert ist. Ein a-priori-Wissen basierend auf einer extrinsischen Information ist in diesem Fall nicht vorhanden. Die Codierungsrate  $R_c$  kann zwischen  $1/2$  und  $1$  je nach dem QoS-Kriterium variiert werden. Da  $N_c = 2$  gilt, können die RSC-Codierer auf zwei unterschiedlichen Codes basieren, und das QoS-Kriterium und die Codierungskomplexität können variiert werden, indem eine be-

stimmte Redundanzsequenz  $C_1$  oder  $C_2$  ohne Änderung der Codierungsrate  $R_c$  unterdrückt wird.

Die oben erwähnten Möglichkeiten verhindern jedoch einen Turbo-Code-Betrieb, der nur zur Verfügung steht, wenn Bits von beiden Redundanzsequenzen  $C_1$  und  $C_2$  übertragen werden und gilt:

$$u_0 \# u_{1,n}$$

wobei  $u_0$  und  $u_{1,n}$  in  $u$  beziehungsweise  $u_1$  enthalten sind. In diesem Fall gilt:

$$R_{c,\min} \leq R_c < 1.$$

Die minimale Codierungsrate  $R_{c,\min} 1/(N_c + 1)$  wird realisiert, wenn keine Punktierung durchgeführt wird. In diesem Fall kann entweder die herkömmliche RSC-Decodierung oder die Turbo-Decodierung realisiert werden, je nach dem QoS-Kriterium und Übertragungskanalzustand, wobei beide Faktoren bei Übertragungsanwendungen zeitlich variieren.

Bei echtem Turbo-Codebetrieb sind folgende Varianten möglich. Die Sequenz  $u$  wird nicht punktiert, die Redundanzsequenzen  $c_1$  und  $c_2$  werden teilweise punktiert. In diesem Fall ist ein Betrieb als RSC-Code oder als Turbo-Code möglich, die Zahl der Decodierungs-Iterationen ist einstellbar und die Codierungsrate kann zwischen  $1/3$  und  $1$  liegen. Diese Art der Punktierung wird Berrou's-Punktierung genannt.

Eine alternative Möglichkeit besteht darin, daß die Sequenz  $u$  und die Redundanzsequenzen  $c_1$  und  $c_2$  teilweise punktiert werden. In diesem Fall ist ein Betrieb mit RSC-Code nicht möglich, sondern nur mit einem Turbo-Code. Die Zahl der Decodierungs-Iterationen ist einstellbar, und die Codierungsrate kann zwischen  $1/3$  und  $1$  liegen. Diese Art der Punktierung wird UKL-Punktierung (UKL = University Kaiserslautern) genannt. Schließlich kann noch der Fall betrachtet werden, daß keine Punktierung stattfindet. In diesem Fall ist der Betrieb mit einem RSC-Code und einem Turbo-Code möglich. Die Zahl der Decodierungs-Iterationen ist einstellbar und die Codierungsrate liegt bei  $1/3$ .

Das vorteilhafte Merkmal bei RCPTC liegt in der Möglichkeit, die Codierungsrate  $R_c$  adaptiv zu ändern, wobei bei einem ARQ die erforderliche Information übertragen werden kann, ohne das gesamte, codierte Paket übertragen zu müssen. Die Übertragung eines zusätzlichen Teiles der Information, der die Differenz in der Codierungsrate ausgleicht, ist ausreichend.

Nachdem die Möglichkeiten der Anpassung der Codierung, im Fall von RCPTC beschrieben wurden, werden nun die Auswirkungen der Anpassungsmöglichkeiten auf die Leistungsfähigkeit des Systems bei Verwendung von RCPTC anhand von Simulationen beschrieben.

Fig. 4 zeigt die Leistungsfähigkeit des RCPTC in einer graphischen Darstellung in der die Bitfehlerrate BER gegen das Signal/Rausch-Verhältnis  $E_b/N_0$  für eine Sprachübertragung über einen AWGN-Kanal dargestellt ist. Die Paketgröße war  $150$  bit, und die Codierungsrate etwa  $= 1/3$ . Die Trägerdatenrate für die Sprachübertragung betrug  $8 = \text{kbit/s}$ . Die uncodierte Übertragung wird als Bezugslinie gezeigt. Der Parameter dieser Simulationen ist die Zahl der Decodierungs-Iterationen, die zwischen  $1$  und  $5$  variiert. Nach der ersten Decodierungs-Iteration ist das minimale Signal/Rausch-Verhältnis, das erforderlich ist, um eine Bitfehlerrate von  $< 10^{-3}$  zu erreichen, etwa gleich  $3,5$  dB. Nach der zweiten Decodierungs-Iteration ist etwa  $1,3$  dB weniger erforderlich. Die nächste Decodierungs-Iteration ermöglicht einen weiteren Gewinn von  $0,2$  dB. Die nächsten Iteration

ermöglichen Gewinne von weniger als  $0,1$  dB. Nach fünf Iterationen ist das minimale Signal/Rausch-Verhältnis, das für eine Bitfehlerrate von weniger als  $10^{-3}$  erforderlich ist, etwa gleich  $1,8$  dB. Es ist demnach ersichtlich, daß die Leistungsverbesserung mit zunehmender Iterationen weniger wird. Im Vergleich erfordert ein herkömmlicher NSC-Code mit einer Constraint-Länge von  $9$  etwa  $1,9$  dB, um dieselbe Bitfehlerrate von  $< 10^{-3}$  zu erreichen. Der RCPTC ist daher etwas leistungsfähiger als herkömmliche Codes selbst bei so kleinen Paketgrößen wie  $150$  bit.

Fig. 5 zeigt die Leistungsfähigkeit des RCPTC in einer graphischen Darstellung, in der die Bitfehlerraten BER gegen das Signal/Rausch-Verhältnis  $E_b/N_0$  für Schmalband-ISDN bei einer Trägerdatenrate von  $144 \text{ kbit/s}$ , einer Paketgröße von  $672$  bit, einer Coderate von etwa  $1/2$  und einem voll einem Interleaving unterzogenen Rayleigh-Fading-Kanal gezeigt ist. Der Simulationsparameter ist wiederum die Zahl der Decodierungs-Iterationen. Nach vier Decodierungs-Iterationen erfordert eine Bitfehlerrate von weniger als  $10^{-3}$  ein minimales Signal/Rausch-Verhältnis von  $3,8$  dB. Nach zehn Iterationen sind nur noch etwa  $3,4$  dB erforderlich. Ein herkömmlicher NSC-Code mit einer ähnlichen Decodierungskomplexität wie vier Decodierungs-Iterationen hat einen Constraint-Länge von  $8$  und erfordert ein um  $1,1$  dB höheres Signal/Rausch-Verhältnis.

Die Fig. 6 bis 9 zeigen graphische Darstellungen für die Leistungsfähigkeit bei Verwendung von RCPTC, wobei die Bitfehlerrate BER beziehungsweise die Rahmenfehlerrate FER gegen das Signal/Rausch-Verhältnis  $E_b/N_0$  aufgetragen ist. Fig. 6 zeigt die Bitfehlerrate gegen das Signal/Rausch-Verhältnis bei einer Paketgröße von  $672$  bit, zehn Decodierungs-Iterationen und einem AWGN-Kanal. Fig. 7 zeigt die Bitfehlerrate gegen das Signal/Rausch-Verhältnis bei einer Paketgröße von  $672$  bit, zehn Decodierungs-Iterationen und einem voll einem Interleaving unterworfenen Rayleigh-Fading-Kanal. Fig. 8 zeigt die Rahmenfehlerrate FER gegen das Signal/Rausch-Verhältnis bei einer Paketgröße von  $672$  bit, zehn Decodierungs-Iterationen und einem AWGN-Kanal. Fig. 9 zeigt die Rahmenfehlerrate gegen das Signal/Rausch-Verhältnis bei einer Paketgröße von  $672$  bit,  $10$  Decodierungs-Iterationen und einem voll einem Interleaving unterworfenen Rayleigh-Fading-Kanal. In den graphischen Darstellungen der Fig. 6 bis 9 werden zwei unterschiedliche Punktierungsverfahren angewendet, nämlich die Berrou's-Punktierung und die UKL-Punktierung, die oben erwähnt wurden. Es ist ersichtlich, daß die Berrou's-Punktierung eine bessere Leistungsfähigkeit bei geringeren Werten des Signal/Rausch-Verhältnisses hat, während die UKL-Punktierung bei einem hohen Signal/Rausch-Verhältnis und daher bei Bitfehlerraten von  $< 10^{-4}$  vorteilhaft ist. Die Kreuzungspunkte bewegen sich in Richtung auf niedrigere Bitfehlerraten bei wachsenden Codierungsraten.

In Fig. 10 ist die Bitfehlerrate gegen die Varianz der log-Likelihood-Verhältnisse (LLR = Log-Likelihood Ratio) an dem Ausgang des zweiten Decodierers gezeigt, wobei ein RCPTC, eine Paketgröße von  $372$  bit, zehn Decodierungs-Iterationen und ein AWGN-Kanal angenommen wird. Aus dieser Figur ist ersichtlich, daß die Codierungsrate keinen Einfluss auf die Beziehung zwischen der Bitfehlerrate und der Varianz  $\sigma^2_{1,LLR}$  hat, weil diese beiden Größen eine ähnliche Abhängigkeit von dem Signal/Rausch-Verhältnis  $E_b/N_0$  haben. Daher kann, wenn  $\sigma^2_{LLR}$  bekannt ist, eine Abschätzung der Bitfehlerrate leicht durchgeführt werden, deren Ergebnis als Basis für eine Aktion dienen kann, beispielsweise für eine Anpassung der Decodierungs-Iterationszahl oder der Codierungsrate zur Verbesserung der Übertragungsqualität oder, im Falle von ARQ, zur Anforderung einer erneuten Sendung eines fehlerhaft codierten Pakets.

Schließlich zeigt Fig. 11 die Varianz  $\sigma^2_{LLR}$  des Log-Likelihood-Verhältnisses LLR am Ausgang des zweiten Decodierers im Verhältnis zu dem Signal/Rausch-Verhältnis  $E_B/N_0$  bei Verwendung von RCPTC mit einer Paketgröße von 600 bit, einer Coderate von etwa 5/9, zehn Decodierungs-Iterationen und einem AWGN-Kanal. Der RCPTC war für einen 64 kbit/S-Trägerservice ausgelegt. Aus Fig. 11 ergibt sich, daß eine ähnliche Überlegung wie im Zusammenhang mit Fig. 10 auch für die Abhängigkeit der Varianz  $\sigma^2_{LLR}$  von dem Auftreten von Paketfehlern zutrifft.  $\sigma^2_{LLR}$  ist bei fehlerhaft decodierten Paketen immer größer als  $\sigma^2_{LLR}$  im Falle von korrekt decodierten Paketen. Wenn daher das Signal/Rausch-Verhältnis  $E_B/N_0$  und  $\sigma^2_{LLR}$  für ein gerade überprüfbares Paket bekannt sind, kann eine Soft-Decision-Variable, die mit der Wahrscheinlichkeit eines Paketfehlers in Beziehung steht, leicht erzeugt und zu Steuerungszwecken eingesetzt werden.

Obwohl sich die vorliegende Beschreibung hauptsächlich auf die Anwendung der Erfindung auf den digitalen Mobilfunk bezieht, ist die Erfindung nicht darauf beschränkt sondern kann allgemein bei digitalen Übertragungssystemen, beispielsweise bei leistungsgebundenen Systemen, optischen Übertragungssystemen (Infrarot- und Laser-Übertragungssysteme), Satellitenfunksystemen, Deep-Space-Übertragungssystemen, Richtfunk-Übertragungssystemen und Rundfunk-Übertragungssystemen (Digitales Radio oder TV), mit den genannten Vorteilen eingesetzt werden.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Abschätzung der Dienstqualität auf Übertragungskanälen in einem digitalen Übertragungssystem, bei dem zur Kanalcodierung senderseitig in einem Turbo-Codierer eine Turbo-Codierung und empfangenseitig in einem Turbo-Decodierer eine Turbo-Decodierung mit Soft-Decision-Ausgangssignalen durchgeführt wird, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Dienstqualität aus den Varianzen der Soft-Decision-Ausgangssignale an dem Turbo-Decodierer bestimmt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei empfangenseitig ein Soft-Input/Soft-Output-Symbol oder -Sequenzschätzer verwendet wird, dadurch gekennzeichnet, daß die Dienstqualität aus den Varianzen  $\sigma^2$  der Soft-Decision-Ausgangssignale des Turbo-Decodierers bestimmt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß aus den Varianzen  $\sigma^2$  die Bitfehlerrate als Maß für die Dienstqualität berechnet wird.
4. Verfahren nach Anspruch 2, wobei empfangenseitig ein MAP-Symbolschätzer oder ein MAP-Sequenzschätzer verwendet wird, dadurch gekennzeichnet, daß die Dienstqualität aus den Varianzen  $\sigma^2_{LLR}$  der Soft-Decision-Ausgangssignale des Turbo-Decodierers bestimmt wird.
5. Verfahren nach Anspruch 2, wobei empfangenseitig ein Viterbi-Algorithmus zur Sequenzschätzung verwendet wird, dadurch gekennzeichnet, daß die Dienstqualität aus den Varianzen  $\sigma^2_{VIT}$  der Soft-Decision-Ausgangssignale des Turbo-Decodierers bestimmt wird.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zur Punktierung eine sogenannte Berrou's-Punktierung eingesetzt wird, bei der nur die nichtsystematische Information punktiert wird.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß zur Punktierung die sogenannte UKL-Punktierung eingesetzt wird, bei der sowohl eine systematische als auch die nicht-systematische Information punktiert wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Zahl der Decodierungsiterationen unter Berücksichtigung der damit verbundenen Zeitverzögerung der Verbesserung des Decodierungsergebnisses optimiert wird.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß als Turbo-Code ein RCPTC verwendet wird.

10. Einrichtung zur Abschätzung der Dienstqualität auf Übertragungskanälen in einem digitalen Übertragungssystem mit einem senderseitigen Turbo-Codierer und einem empfangenseitigen Turbo-Decodierer, der Soft-Decision-Ausgangssignale abgibt, zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Recheneinrichtung, die die Dienstqualität aus den Varianzen der Soft-Decision-Ausgangssignale des Turbo-Decodierers (22) berechnet.

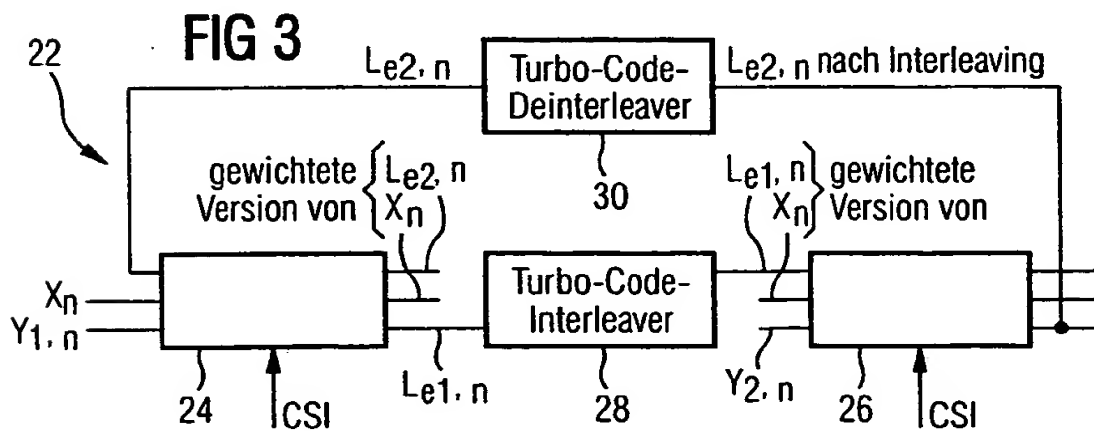
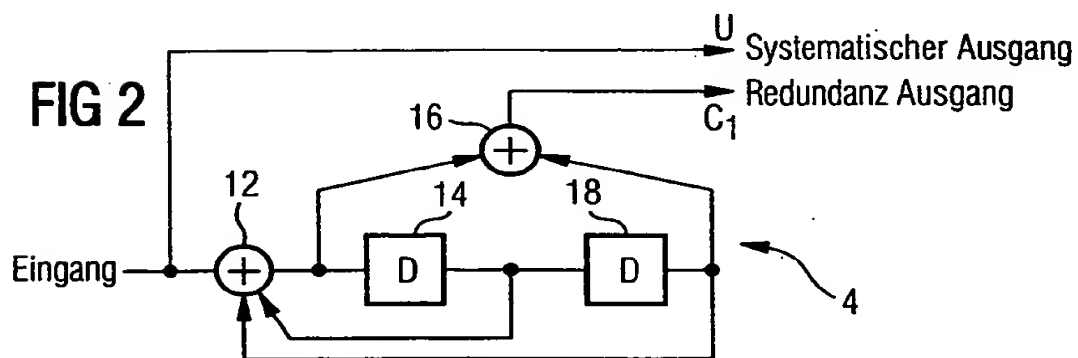
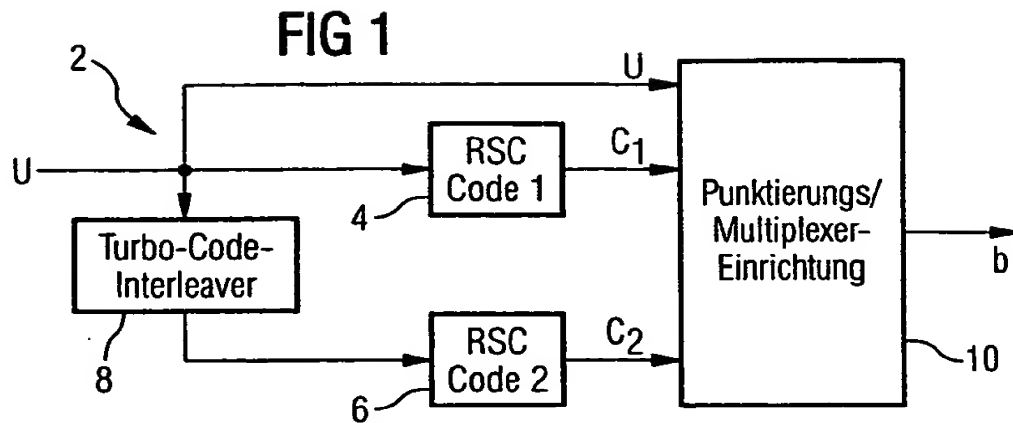
11. Einrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß der Turbo-Codierer (2) zwei, parallelgeschaltete RSC-Codierer (4, 6), einen Interleaver (8), der einem der RSC-Codierer (6) vorgeschaltet ist, und eine Punktierung/Multiplexer-Einrichtung (10) aufweist, der die systematischen Sequenzen und die codierten Sequenzen von den RSC-Codierern (4, 6) zugeführt wird, und daß der Turbo-Decodierer (22) zwei RSC-Decodierer (24, 26), einen Turbo-Code-Interleaver (28) zwischen einem Ausgang des ersten RSC-Decodierers (24) und einem Eingang des zweiten RSC-Decodierers (26) sowie einen Turbo-Code-Deinterleaver (30) zwischen einem Ausgang des zweiten RSC-Decodierers (26) und einem Eingang des ersten RSC-Decodierers (24) aufweist.

12. Einrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Punktierungs/Multiplexer-Einrichtung (10) eine Punktierung nach der sogenannten Berrou's-Punktierung durchführt, bei der nur die nicht-systematische Information punktiert wird.

13. Einrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Punktierungs/Multiplexer-Einrichtung (10) eine Punktierung nach der UKL-Punktierung durchführt, bei der sowohl die systematische als auch die nicht-systematische Information punktiert wird.

14. Einrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Zahl der Decodierungs-Iterationen in dem Turbo-Decodierer (22) unter Berücksichtigung der damit verbundenen Zeitverzögerung unter Verbesserung des Decodierungsergebnisses optimiert wird.

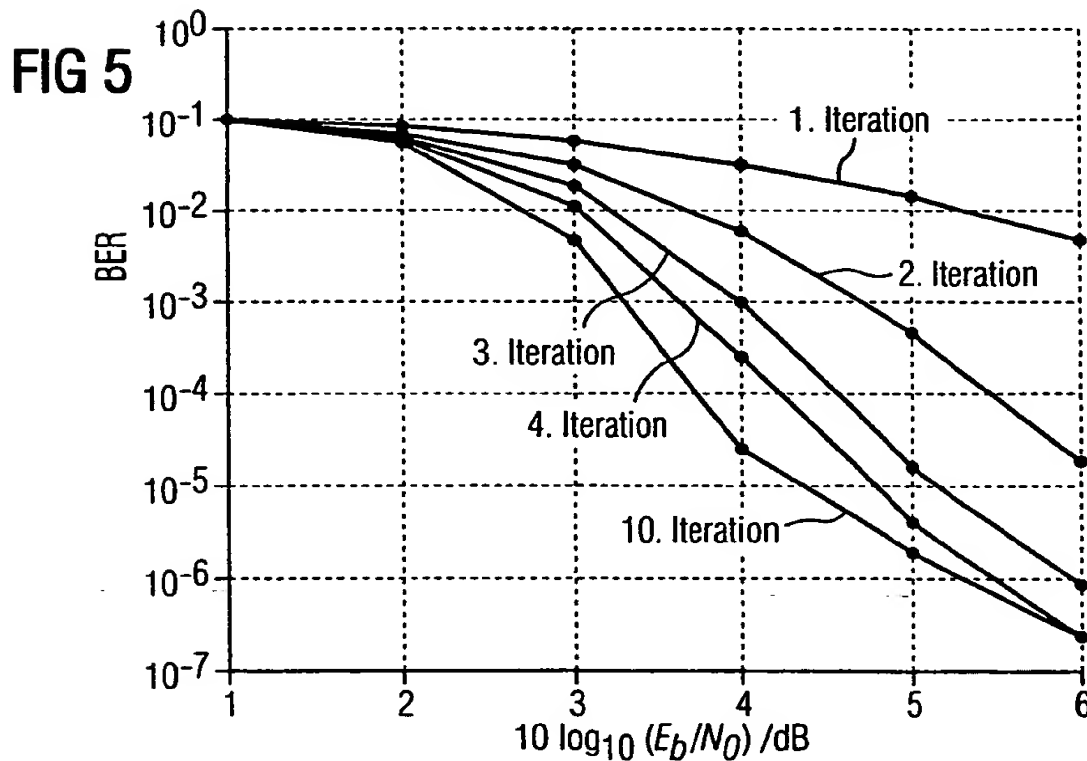
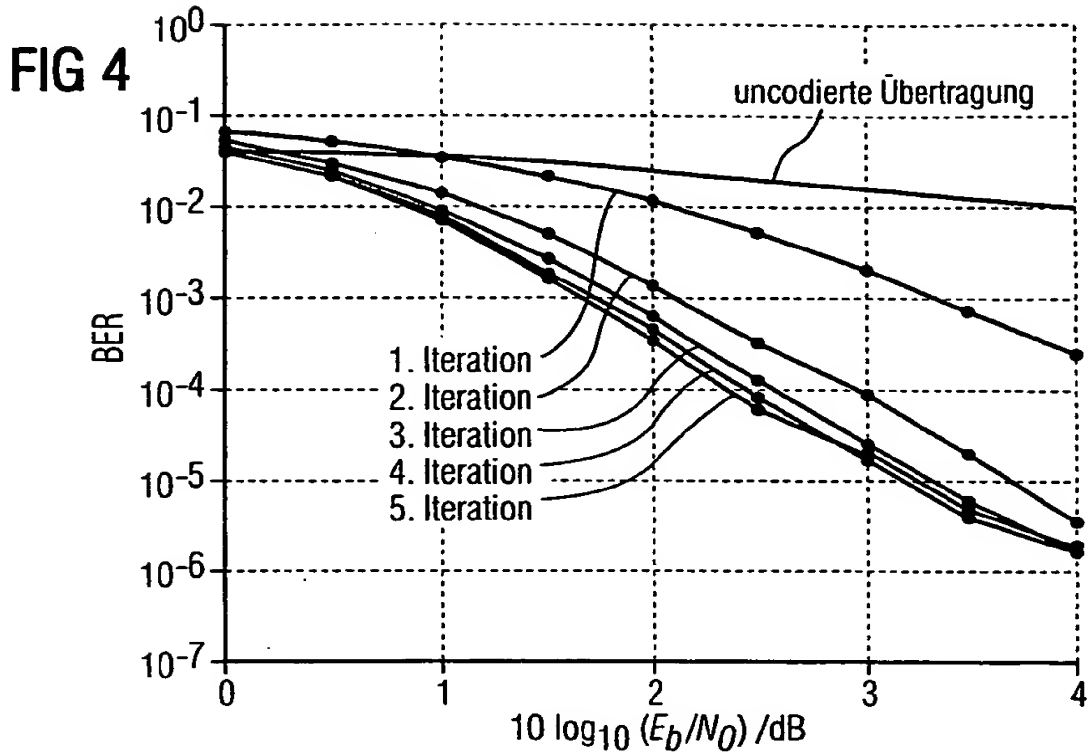
Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen



- Leerseite -

***This Page Blank (uspto)***





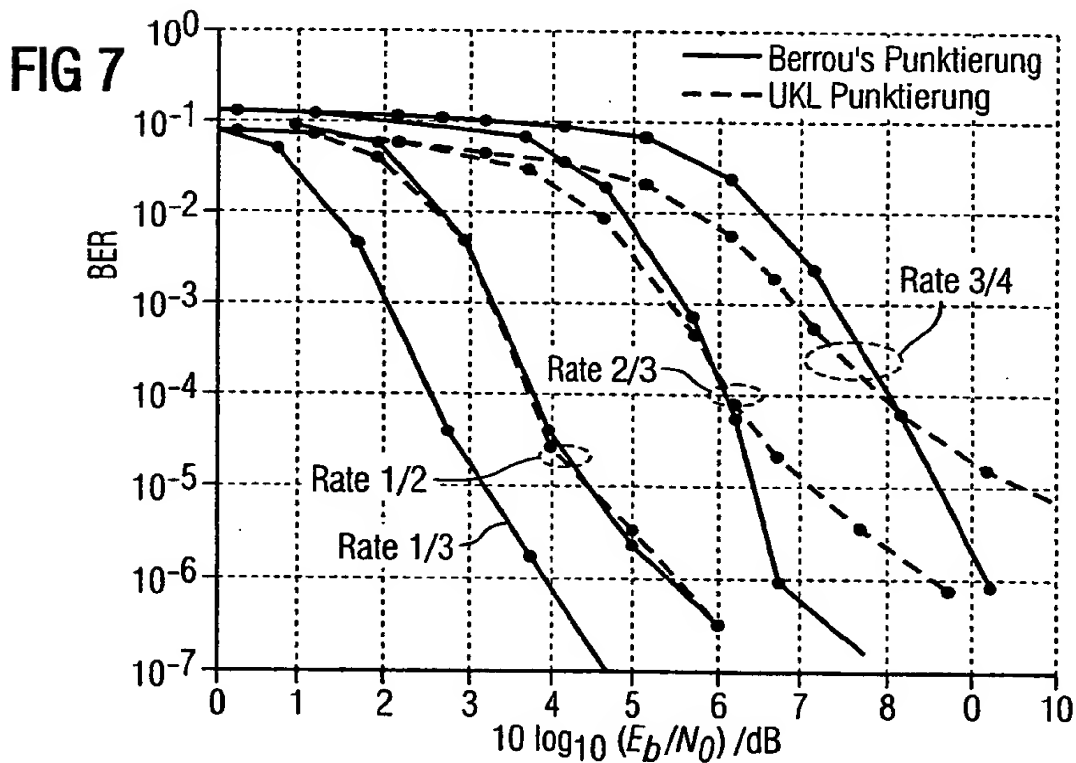
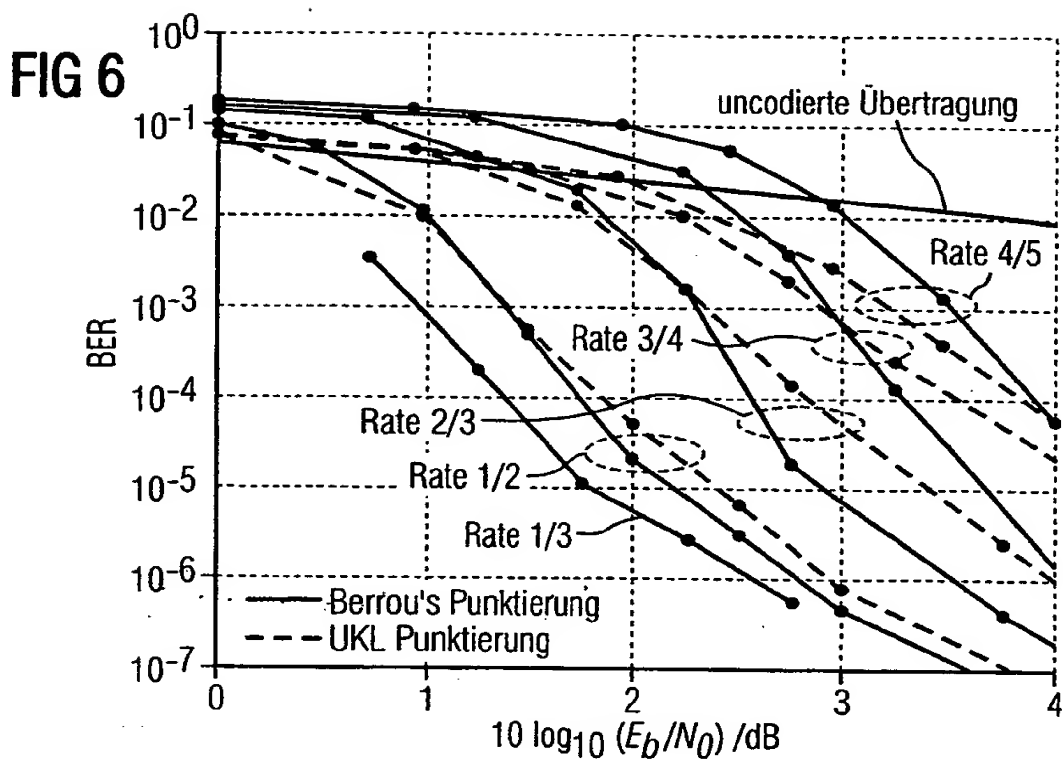


FIG 8

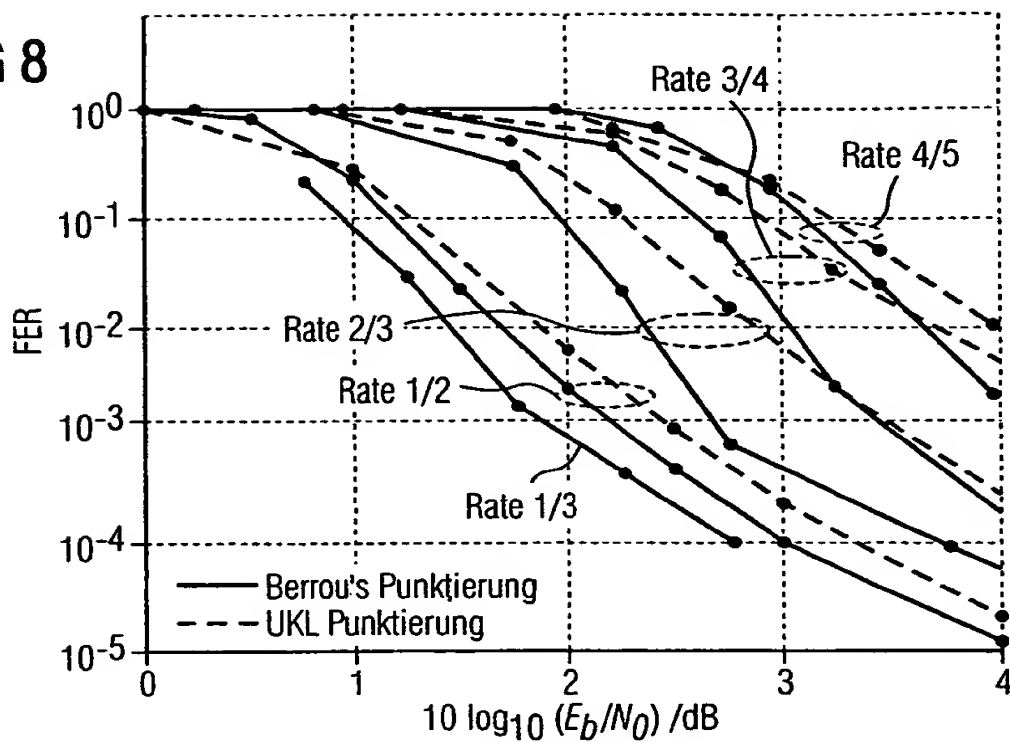
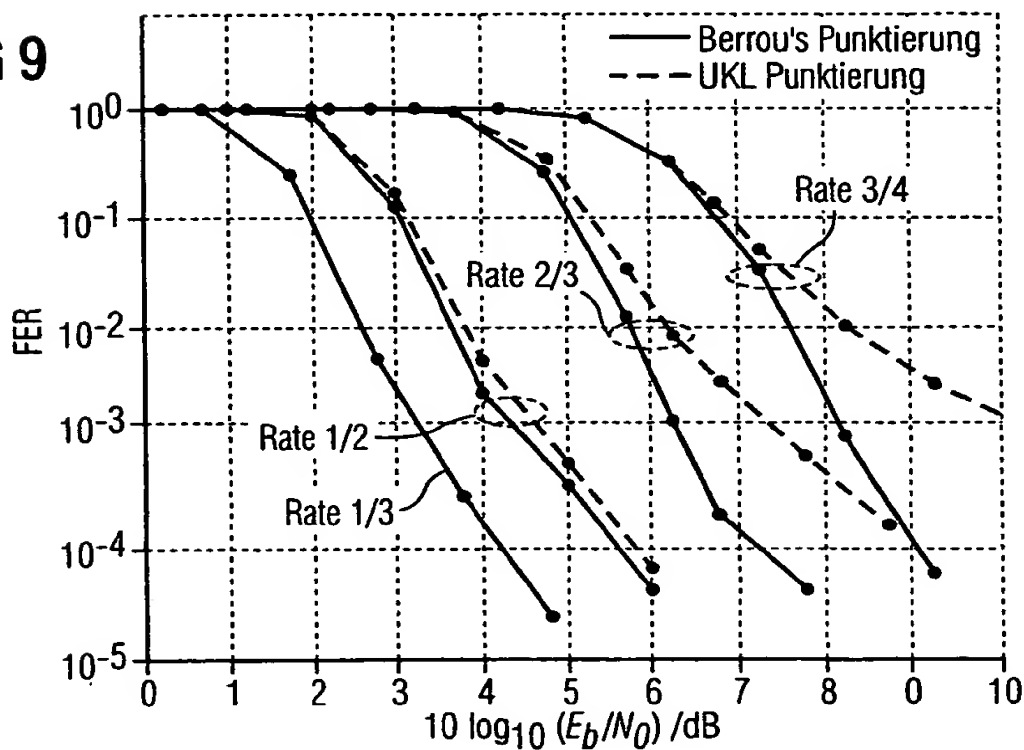
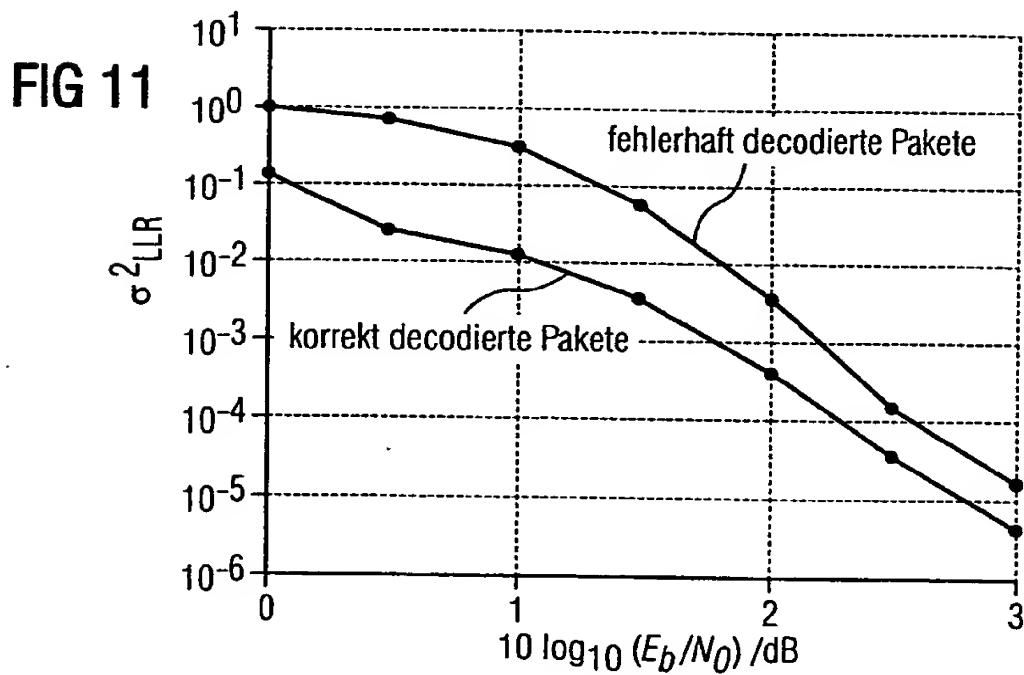
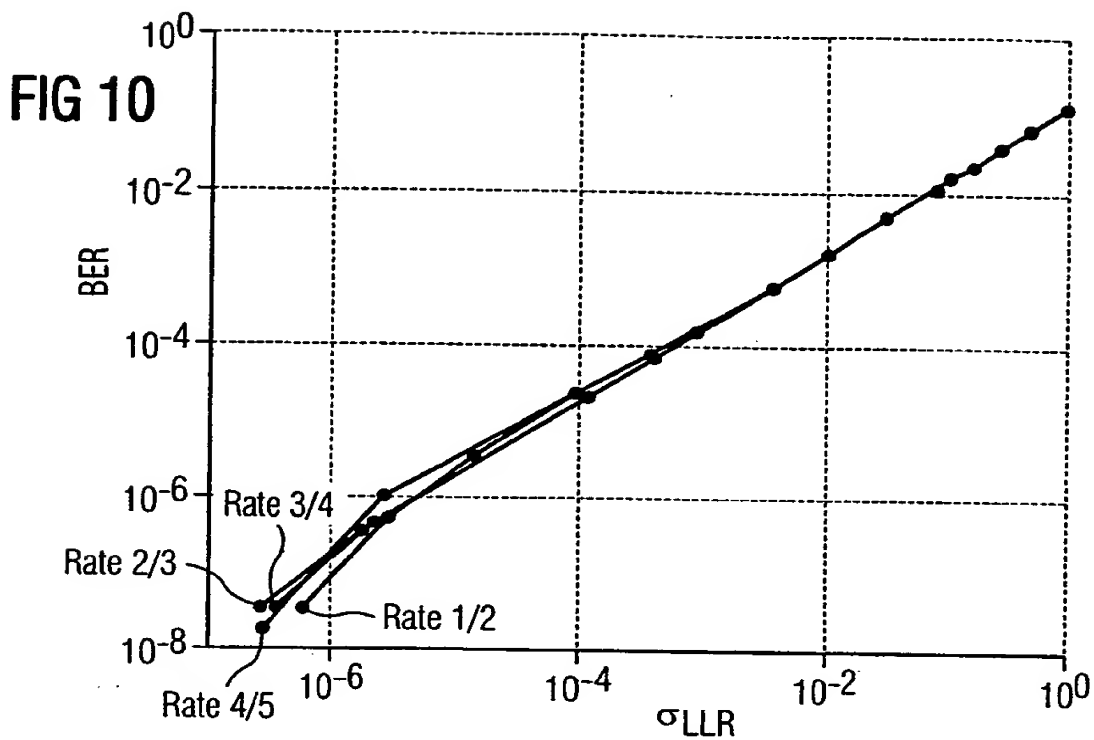
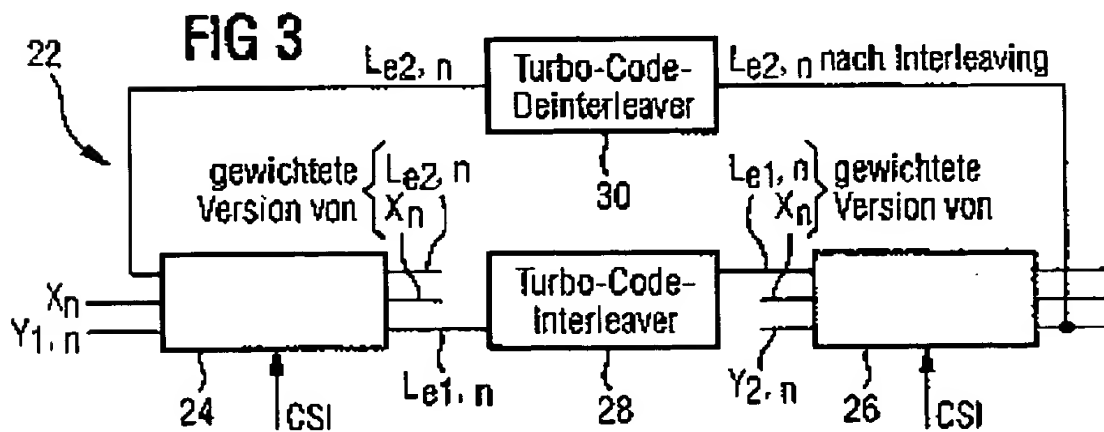
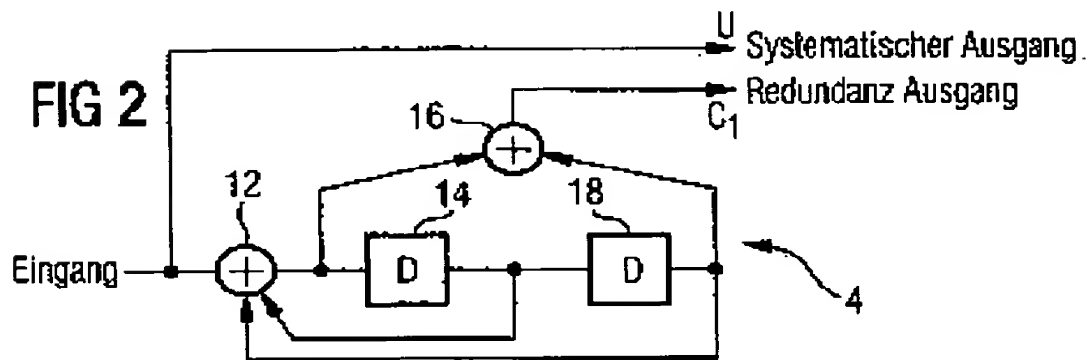
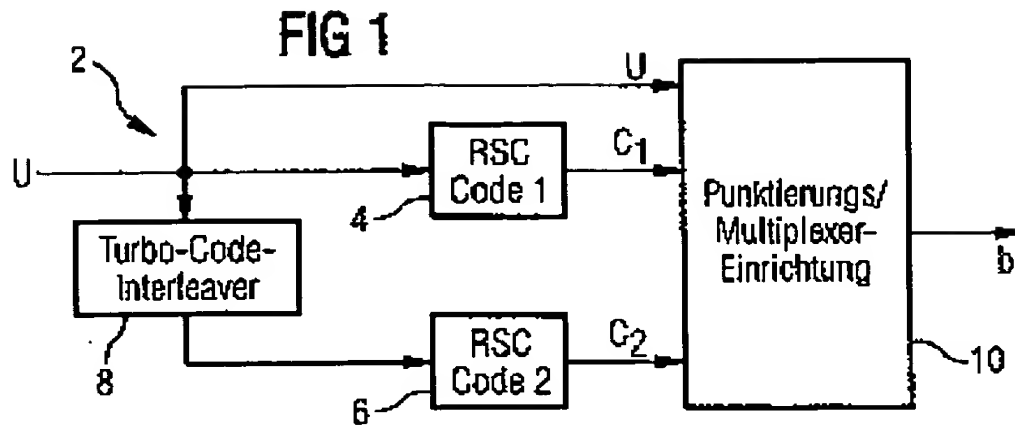
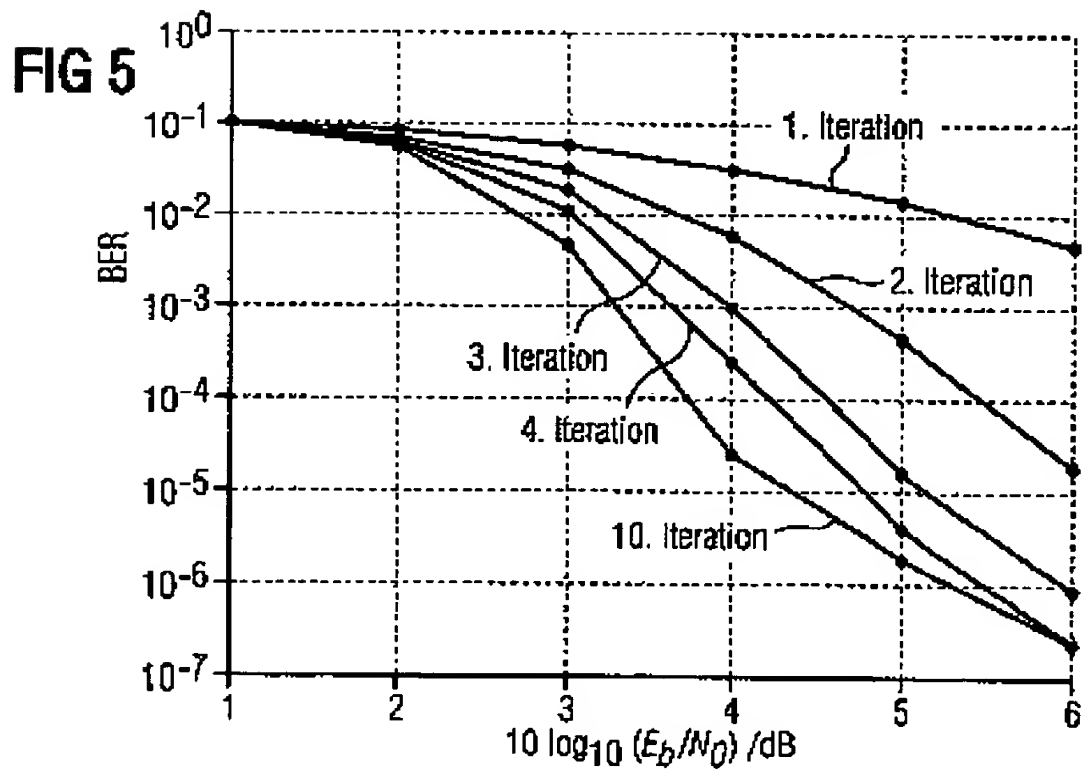
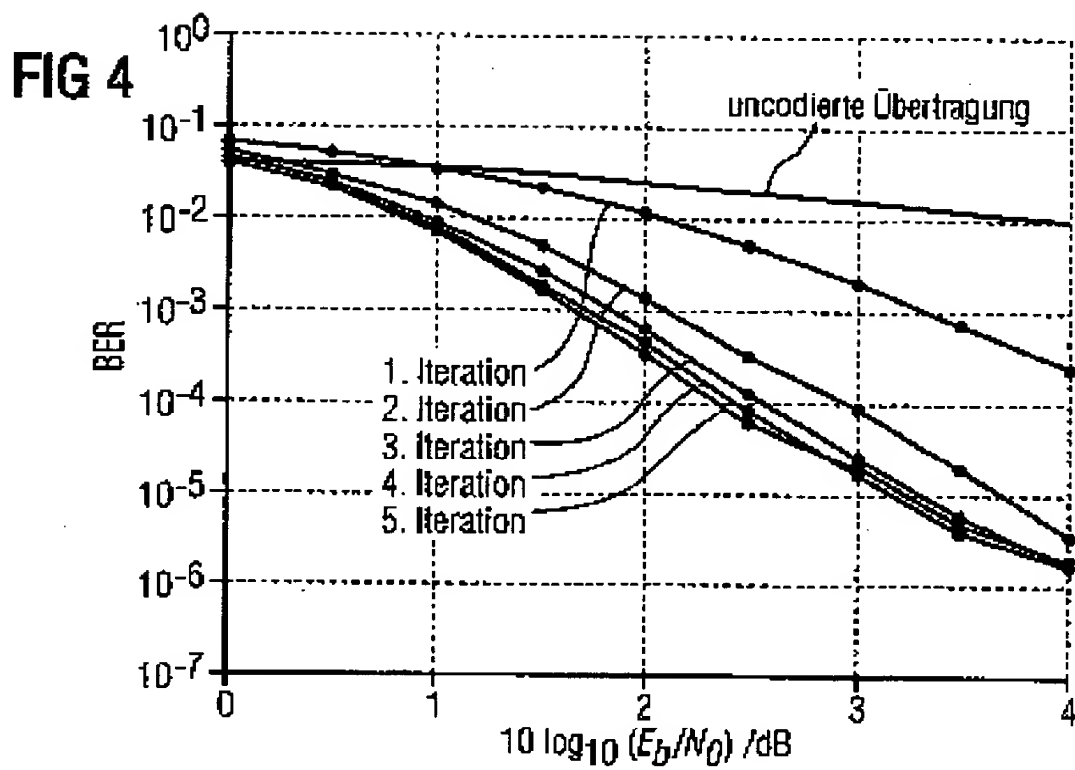


FIG 9









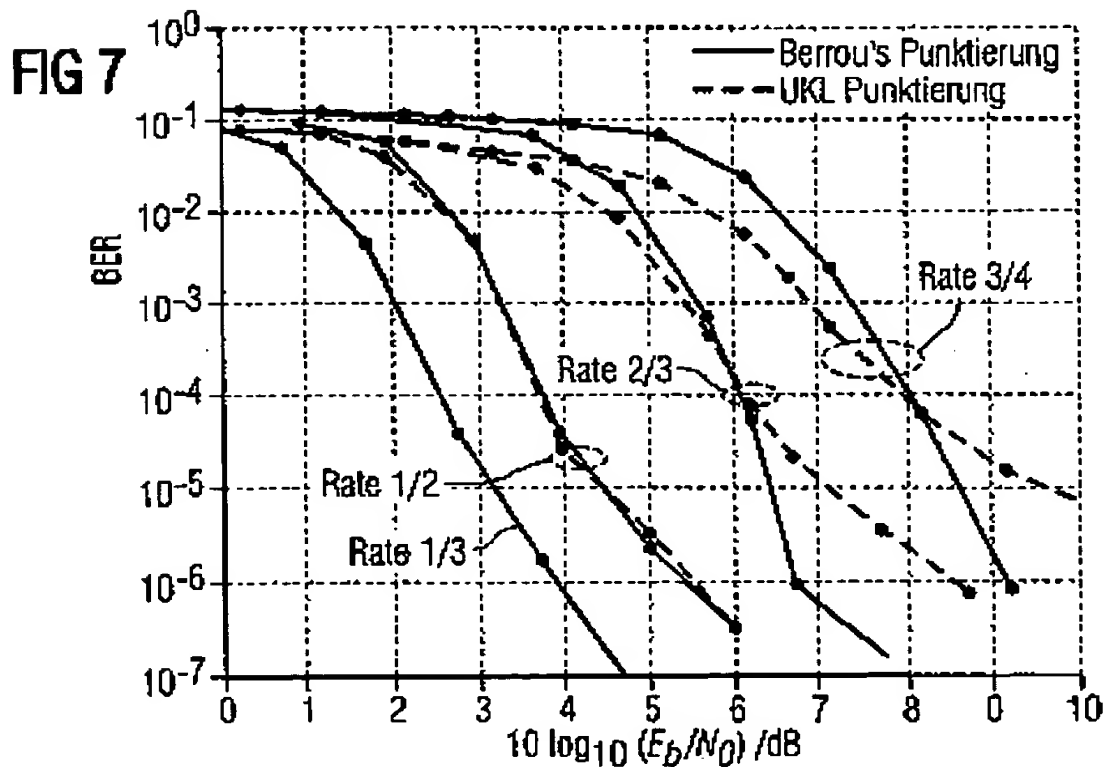
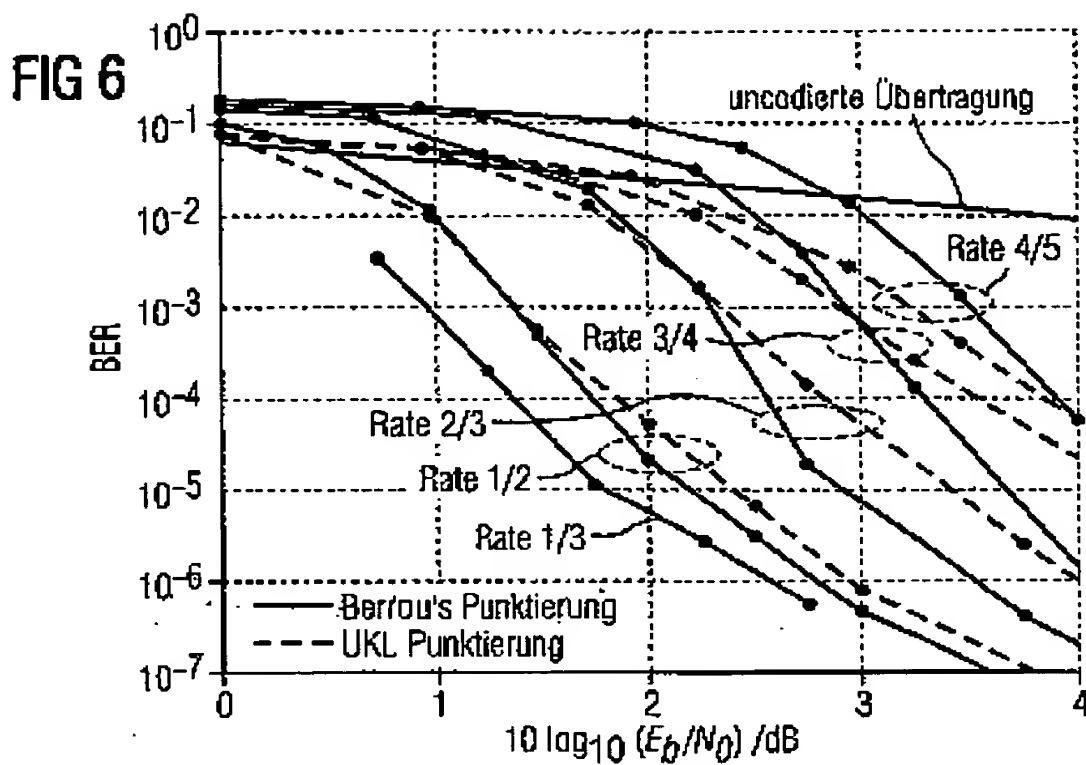


FIG 8

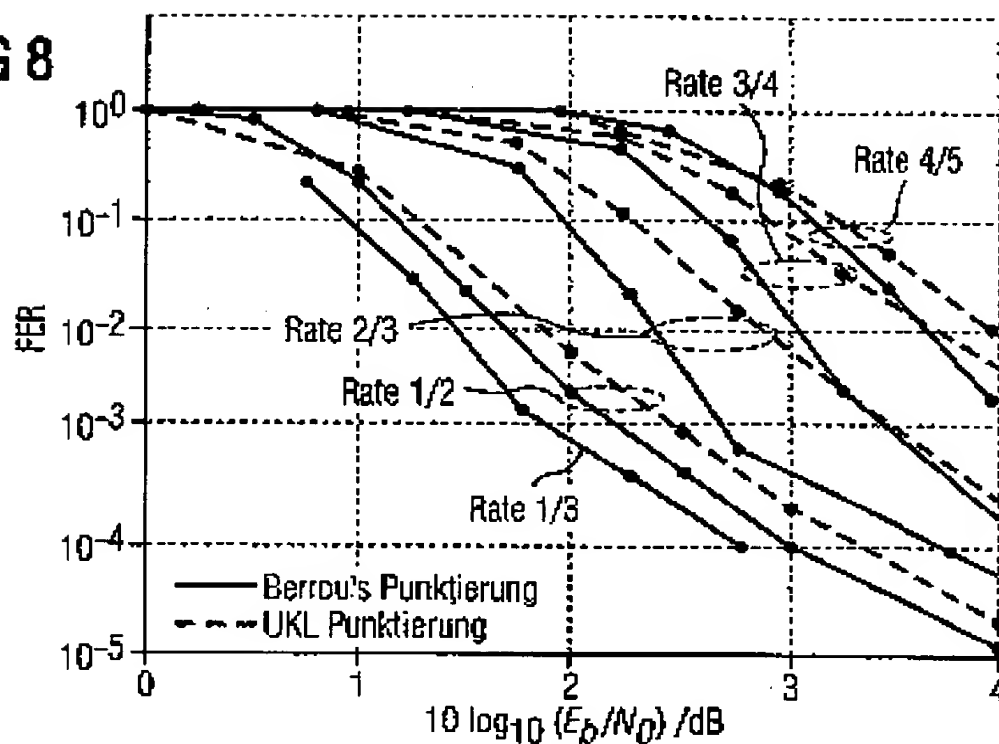
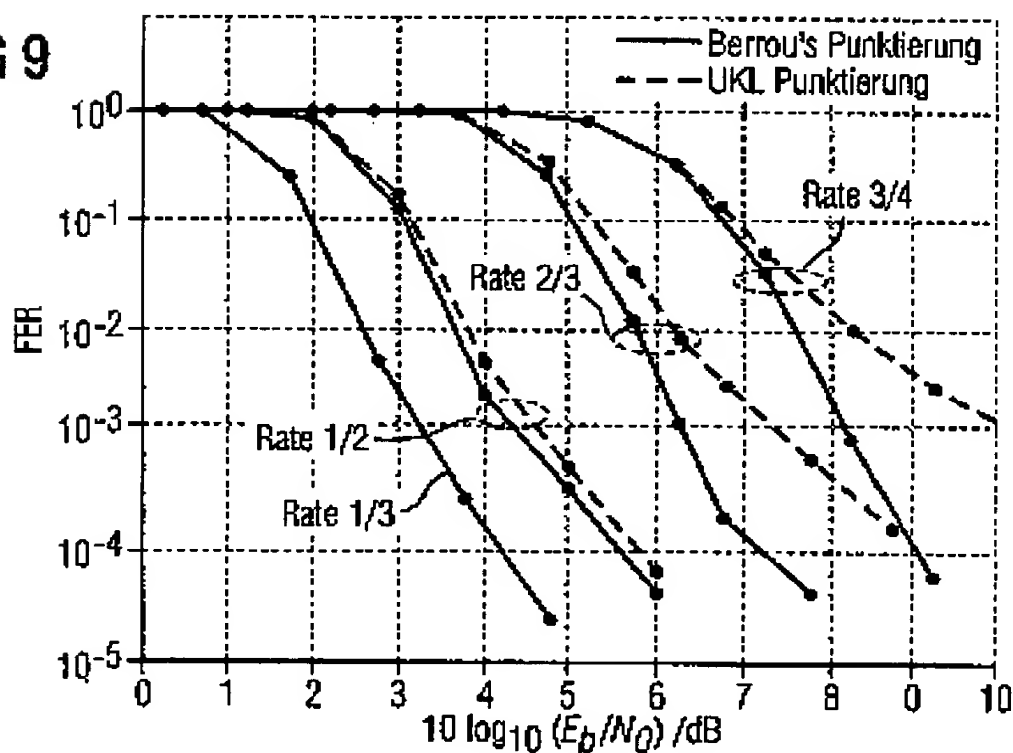
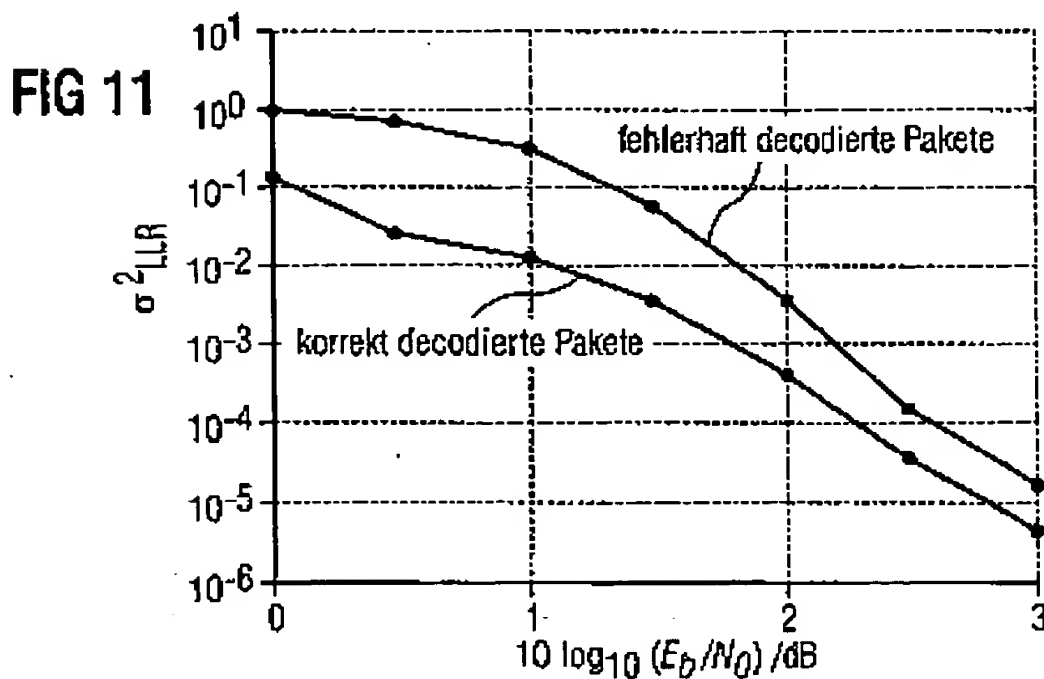
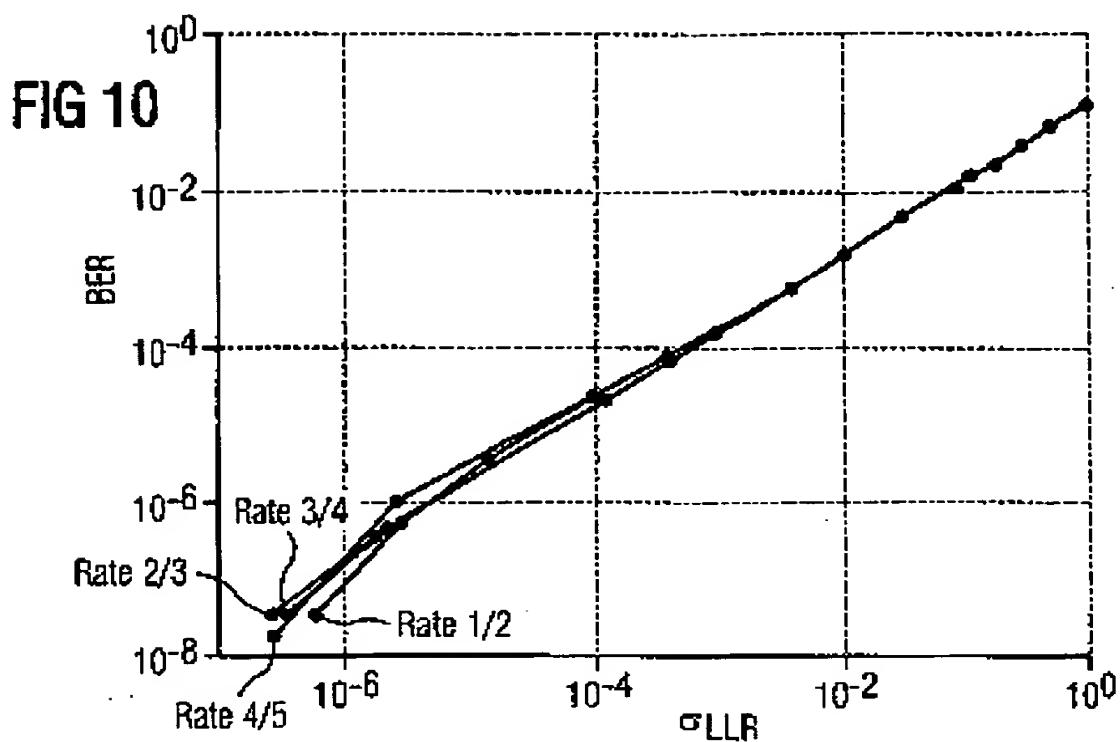


FIG 9







**This Page Blank (uspto)**

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☒ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER: \_\_\_\_\_**

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**

**This Page Blank (uspto)**